工作记忆负荷对反馈加工过程的影响：来自脑电研究的证据

贾世伟　齐丛丛　陈乐乐　任衍具

（山东师范大学心理学院，济南 250358 ）

摘要　个体对行为后反馈结果的加工在学习和环境适应方面有重要意义，工作记忆负荷（working memory load, WM load）如何影响反馈加工过程尚不清楚。采用双任务范式，设置基线、低 WM load、高 WM load 三种条件，结合 ERP 技术对这一问题进行探究。发现 RewP（reward positivity，奖赏正波）对效价敏感，而不受 WM load 条件影响；Theta 震荡的正、负反馈差异波在高 WM load 条件下比在低 WM load 条件下小。结果支持等级强化学习-前扣带回理论（HRL-ACC, hierarchical reinforcement learning theory of anterior cingulate cortex）对于 RewP 和 theta 震荡的观点：RewP 反映了反馈效价评估功能，theta 震荡反映了认知控制功能，并且 WM load 选择性影响了 ACC 的认知控制功能而不是反馈效价评估功能。

关键词　工作记忆负荷（WM load），反馈，奖赏正波（RewP），theta 震荡，前扣带回

分类号　B842

1 前言

在日常生活中，反馈对人们的学习与环境适应有重要影响，个体总是趋向于在积极的反馈后保持自己的既有行为，在消极的反馈后调整自己原先的行为，依此习得知识和技能(Luft, 2014）。等级强化学习-前扣带回理论（hierarchical reinforcement learning theory of anterior cingulate cortex function, HRL-ACC theory）(Holroyd & Yeung, 2011; Holroyd & Umemoto, 2016）对此提出了详细的模型。另一个显而易见的事实是，学习往往并不是某一行为的孤立操作，而是需要同时进行多个任务，例如学生在课堂上需要一边听讲一边记录笔记。与单一任务相 比，在进行多项任务时，个体对认知资源的需求增加，工作记忆负

收稿日期：2021-04-19

* 国家自然科学基金项目(31200784)资助。

通信作者：任衍具, E-mail: renyanju@gmail.com

荷（working memory load, WM load）增加（Krigolson et al., 2012）。已有研究发现，在执行双任务或多任务操作时，WM load 增加会对原本进行的心理过程产生干扰（Krigolson et al., 2015; White & Grant, 2017; 程家萍等, 2017），但 WM load 如何影响反馈加工尚不清楚。HRL-ACC 理论（Holroyd & Umemoto, 2016）虽然提及 WM load 对反馈加工与学习的影响，但是缺乏直接证据。本研究使用脑电技术对这一问题进行探究。

奖赏正波（RewP, reward positivity），早期被称作反馈相关负波（feedback related negativity, FRN），是反馈加工诱发最重要的 ERP 成分。RewP 对反馈效价敏感，正反馈比负反馈诱发更正的正波。该成分出现在反馈刺激后 200~350 ms 范围内，最大波幅分布于头皮中前部，偶极子溯源分析和神经影像学研究认为 RewP 的脑内发生源位于前扣带回（anterior cingulate cortex, ACC）和纹状体附近（Gehring & Willoughby, 2002; Glazer et al., 2018; Hajcak et al., 2006; Miltner et al., 1997; Sambrook & Goslin, 2015）。对 RewP 所反映的心理功能的理解经历了一个转变，早期认为 RewP 反映了负反馈（如金钱损失）加工，负反馈诱发了更负的负波（Gehring & Willoughby, 2002; Hajcak et al., 2006; Miltner et al., 1997; Yeung & Sanfey, 2004），因此早期称作 FRN。随着研究的深入，研究者转向认为正反馈（如金钱获得）诱发了更正的正波（Baker & Holroyd, 2011; Foti et al., 2011; Proudfit, 2015），正、负反馈条件下 RewP 波幅差异反映了人脑对奖赏的加工，而不是对负反馈的加工，因此 Proudfit 等人（2015）倡议将其改名为 RewP。

Delta（< 3 Hz）和 theta（4~7 Hz）是反馈加工诱发的两个主要震荡成分，并且其分别对金钱获得和损失敏感（Bernat et al., 2011; Cohen et al., 2007）。为了进一步了解 RewP 以及 delta 和 theta 震荡与正反馈加工和负反馈加工的关系，Foti 等人（2015）使用时频分析（time-frequency analysis）对反馈加工诱发脑电成分进行分离，结果发现 theta 震荡在负反馈后显著增强，delta 震荡在正反馈后显著增强；脑内源定位发现前者位于 ACC，后者位于纹状体。Foti 等据此提出折衷性观点，认为 RewP 是对负反馈敏感的 theta 活动和对正反馈敏感的 delta 活动的复合体。

关于 RewP 与反馈加工的关系，强化学习理论（RL, reinforcement learning theory）（Holroyd & Coles, 2002）提出了详细的假设。该理论早期针对 FRN 提出，认为 FRN 反映的是中脑多巴胺系统在强化学习过程中产生的奖赏预期错误信号（RPE, reward prediction error）。当实际反馈优于预期时，多巴胺释放增加；当实际反馈比预期差时，多巴胺则会减少。该信号会被投射到 ACC 中用以进行强化学习，并调节 FRN 的大小。后来 Holroyd 等人改进了该理论，把 ACC 在目标导向行为中的功能分为行为选择和行为驱动两

部分，并把 RewP（虽然由 FRN 改为 RewP，但是其反映效价评估、是 RPE 信号的本质不变）和 theta 震荡（在该理论中称作 frontal midline theta, FMT）都纳入其中，称之 HRL-ACC 理论（Holroyd & Umemoto, 2016; Holroyd & Yeung, 2011; Shahnazian et al., 2018）。HRL-ACC 理论认为，ACC 一方面接收来自中脑多巴胺系统的反馈评估信号（RPE），以学习某一行为或任务的价值，据此选择要实施的行为；另一方面通过对其他脑区（背外侧前额叶，腹侧纹状体）的控制来驱动任务执行。HRL-ACC 理论赋予 RewP 和 theta 震荡重要意义，认为 RewP 是 RPE 信号的脑电指标，作用于 ACC 的输入端；而 theta 震荡是 ACC 发出控制信号的脑电活动，是 ACC 的输出端信号（Holroyd & Umemoto, 2016; Holroyd & Yeung, 2011）。

从以上分析中可知，目前的研究和理论还需要进一步验证。首先，对于 theta 震荡，HRL-ACC 理论认为其反映了 ACC 发出的控制信号。HRL-ACC 理论得出这一观点的重要证据是 theta 震荡会受认知资源（例如工作记忆负荷（WM load）、注意）的影响（Hsieh & Ranganath, 2014; Mitchell et al., 2008），尤其是在需要持续认知控制的任务中（Holroyd & Umemoto, 2016）。但是在反馈加工过程中，theta 震荡是否受到 WM load 水平的调节，还缺乏直接证据。其次，与 HRL-ACC 理论不同，Foti 等人（2015）认为 theta 震荡反映了对负性结果的加工，没有明确说明其是否受到认知资源的影响。因此，本研究将考查 WM load 对反馈加工诱发的 theta 震荡的影响，验证 HRL-ACC 理论关于 theta 震荡的观点，也可以验证 HRL-ACC 理论与 Foti 等人（2015）的观点哪个更合理。另外，反馈加工相关的重要成分 RewP 及其所反映的反馈效价评估过程是否受到 WM load 的影响，目前的研究和理论对此也缺乏关注。本研究将分析 WM load 对 RewP 的影响，探究这一问题。

除了 RewP 以及 theta 和 delta 震荡之外，P3 和 LPP（late positive potential）也是反馈加工诱发的重要脑电成分。P3 在时间窗口上紧随 RewP 出现，分布于头皮中后部。P3 是一个多源性脑电成分，与注意资源的分配、背景信息的整合、工作记忆的更新有关（Glazer et al., 2018; Nieuwenhuis et al., 2005; Polich, 2007）。根据背景更新假设（Donchin & Coles, 1988），如果刺激传递的信息与已有的心理表征不一致，内部表征就会得到更新，P3 反映了心理表征修正时的大脑活动。LPP 在反馈加工过程中是继 RewP、P3 之后出现的 ERP 成分，始于反馈后 500 或 600 ms，延续至 1000 ms 左右，其头皮分布与 P3 大致相同。相对于中性刺激，LPP 在正性或负性刺激后波幅增加，研究认为其反映了人脑加工刺激信息时持续的情感动机过程（Hajcak et al., 2009; Huang & Yu, 2018; Langeslag & van Strien, 2013; Meadows et al., 2016）。

诸多研究观察到 P3 和 LPP 在正、负反馈后有着不同的偏转及波幅变化。有研究发现正反馈后 P3 波幅大于负反馈（Yang et al., 2018; Zhou et al., 2010），认为其代表了反馈加工中注意资源投入或感情价值的变化。有研究发现 LPP 对反馈效价敏感，相对于负反馈，正反馈后 LPP 波幅增加（Broyd et al., 2012; Webb et al., 2017），但是也有研究发现负反馈后 LPP 波幅增加（Donaldson et al., 2016）。LPP 的研究结果之所以有不同之处，一个重要原因是实验任务的不同，不同任务本身的 WM load 不同，例如在 Webb 等人（2017）研究中，被试需要在三个待选项中猜测哪一个隐藏了奖赏（绿色小球），并同时执行一项绿色小球数量的记忆任务，而在 Donaldson 等人（2016）研究中被试只需在两个待选项中猜测奖赏的位置，显然前者对被试的 WM load 挑战更大。本研究也将分析 WM load 水平对反馈加工中 P3 和 LPP 阶段的影响。

本研究采用双任务设计，结合简单赌博任务和工作记忆任务，实现基线、低 WM load 和高 WM load 三个条件，考查 WM load 对反馈加工过程的影响。具体会分析 WM load 对 RewP、P3、LPP 成分，以及 delta、theta 震荡的影响。首先，依据 HRL- ACC 理论，本研究预期 WM load 会调节 theta 活动,尤其会调节 theta 活动的反馈效价效应,不同 WM load 条件下 theta 的效价效应会有所不同；其次，由于 P3 反映了反应模式的更新、反馈加工之后行为调整的过程，本研究预期 WM load 会影响 P3 对反馈效价的加工。此外，WM load 是否会影响 RewP、delta 震荡以及 LPP，目前的理论和研究中没有明确假设，本实验也将探究这个问题。

2 方法

2.1 被试

共有成年被试 25 人参与实验，均为右利手，视力或矫正视力正常，无精神疾病史或头颅外伤史。其中一人在实验中滤波带通设置错误，未记录到有效脑电数据。一人实验中口头报告困倦、疲惫，未能认真执行实验任务。排除两人后，共获得有效被试 23 名[1]（女性 13 名），年龄 18~25 岁（M = 20 ± 1.4）。被试在实验结束后会得到相应的报酬。本研究已通过山东师范大学伦理委员会审查。

2.2 实验设计与程序

实验采用双任务范式，结合工作记忆任务和简单赌博任务。通过简单赌博任务实现反馈

[1] 使用 G*Power 3.1 推算样本量。其中，最大效应值设置为 f = 0.4，α = 0.05，重复测量间相关系数为 r = 0.5。本研究为 2*3 被试内设计，故组数为 1，因素水平为 6。最终推算出样本量为 15 人。本研究获得有效被试数 23 人，满足样本量要求。

加工，通过工作记忆任务操纵 WM load 水平。采用 2×3 被试内设计，两个因素为 WM load 水平（基线、低 WM load、高 WM load）和反馈效价（奖赏、无奖赏）。

工作记忆任务参考 Han 等人（2017）的设计，如图 1a 所示，记忆材料由 4×4 方格（视角：2.9°×2.9°）和作为记忆项的黑色方块组成。工作记忆任务包含两种条件，低 WM load 条件下一个小方块随机分布在方格任一位置，高 WM load 条件下三个小方块随机分布在方格中，但随机前提是三个小方块靠在一起。如图 1b 所示，工作记忆任务包括记忆阶段和探测阶段，简单赌博任务嵌在两个阶段之间。

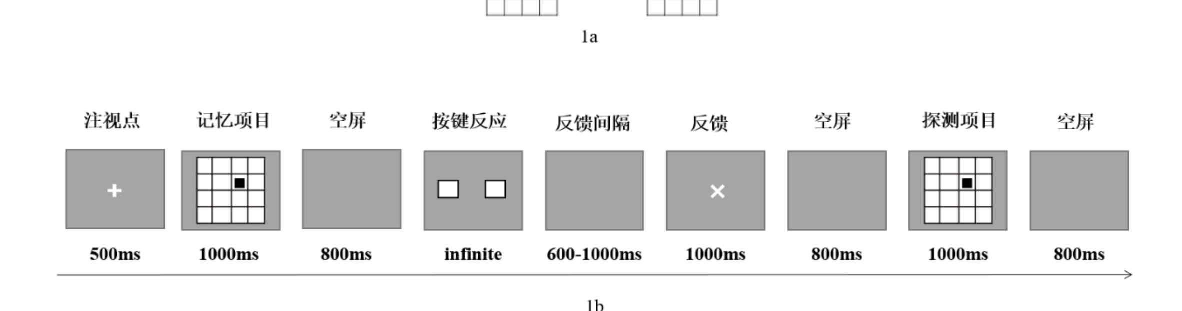


图 1 高 WM load 和低 WM load 条件的记忆材料举例(1a)，以及实验流程图(1b)。如 1b 所示，实验为双任务范式，简单赌博任务嵌在工作记忆任务中。

实验中被试坐在一间隔音、光线适宜的屏蔽间内，距显示屏 100 cm。实验流程如图 1b 所示，首先呈现 500 ms 的注视点，紧接着出现持续 1000 ms 的方格，要求被试记住方格图片中黑色小方块的位置。然后出现 800 ms 的空屏，随后出现两张空白卡片，告知被试如果选择左侧卡片就按“F”键，如果选择右侧卡片就按“J”键，要求被试在 3 s 内做出选择，如果 3 s 内未作出选择，则会出现“选择过慢”的文字提示。选择完成后有 600~1000 ms 随机时长的空屏，之后呈现 1000 ms 的反馈刺激，视角均为 2.3°×2.3°，其中“√”表示本试次赢得 0.1 元，“×”表示没有金钱得失。随后呈现 800 ms 的空屏，再次出现方格图，要求被试判断本张方格图片与之前的方格图片中小方块位置是否相同，相同按“F”键，不同按“J”键，要求 1000 ms 之内做出判断。最后是 800 ms 空屏，为试次间间隔。

除了高、低 WM load 条件，实验中还有一个只有简单赌博任务的基线条件。参考 White 和 Grant（2017）的设计，为避免基线条件被工作记忆条件污染，被试在实验中总是先执行基线条件，基线条件作为一个 block，共包含 100 个试次。低 WM load 条件和高 WM load 条件各有 2 个 block，每个 block 有 50 个试次。高、低 WM load 条件的 4 个 block 的顺序

在不同被试间进行平衡。

在每个条件开始前被试要进行不低于 15 个试次的练习阶段，以保证被试明白实验流程。由于反馈比率会影响反馈相关脑电成分，为保证正、负反馈概率差异不显著，比例都接近 50%，参考前人研究（Hajcak et al., 2006; Huang & Yu, 2018; Langeslag & van Strien, 2013; Shahnazian et al., 2018; Yeung & Sanfey, 2004）实验采用伪随机设计。正反馈与负反馈均伪随机出现，与被试选择的卡片无关。但为了保证被试的任务动机，实验中告知被试待选卡片间存在某种规律，并鼓励被试探索规律，尽可能使赌博任务中的收益最大化。实验结束后告知被试实验任务是伪随机设计以及实验目的。

2.3 脑电记录与处理

实验程序使用 E- Prime 2.0 (Psychology Software Tools, Inc., Sharpsburg, PA)编写。EEG 使用 Brain Products 公司生产的 64 导脑电记录系统(Brain Products GmbH, Munich, Germany)采集，配套电极帽基于 10- 20 系统安放电极。以右眼眼眶下 1.5 cm 电极点记录垂直眼电(VEOG)，以左眼外侧 1.5 cm 处的电极记录水平眼电(HEOG)，同时记录双侧乳突 M1、M2 数据。滤波带通为 0.016~70 HZ，A/D 采样频率为 1000 Hz/导。所有电极以 FCz 点为在线参考，以 AFz 点接地，电极与头皮间的电阻小于 10 KΩ。

使用 Brain Vision Analyzer 2.1 软件进行离线分析。首先将采样率降为 500 Hz，采用双侧乳突平均参考。以 0.1~30 Hz 进行带通滤波，使用独立成分分析校正眼电伪迹，同时剔除波幅超过+/− 80 μV 的其它伪迹。取反馈刺激呈现前 200 ms 至反馈刺激后 800 ms 时间窗内脑电叠加获得 ERP 成分，并以反馈刺激前 200 ms 为基线。

本研究分析了 RewP、P3 和 LPP 三个 ERP 成分。通过脑电结果的人工识别以及参考前人文献确定各成分的取值电极点和时间窗口。对于 RewP，分别从 Fz、FCz 和 Cz 三点，取反馈刺激后 210~290 ms 的平均波幅（Glazer et al., 2018; Proudfit, 2015; Sambrook & Goslin, 2015），然后求三个值的平均数作为 RewP 的波幅。对于 P3，分别从 Pz 和 POz 两点，取 310~400 ms 时间窗口内的平均波幅（Yang et al., 2018; Zhou et al., 2010），然后求两个值的平均数作为 P3 的波幅。对于 LPP，分别从 Cz、CPz、Pz 和 POz 四点，取 500~750 ms 时间窗口内平均波幅（Broyd et al., 2012; Donaldson et al., 2016），然后求四个值的平均数作为 LPP 的波幅。

时频分析参考 Webb 等人（2017）的方法，在 Brain Vision Analyzer 2.1 中选择连续小波变换（Continuous wavelet transformation, CWT）。与时域分析类似，先对 EEG 数据进行时间段划分，为避免边缘效应（edge effects），分段时将时间窗口进行延伸，采用

反馈呈现前 1000 ms 和反馈呈现后 1500 ms 时间段的 EEG 进行复 Morlet 小波变换(Morlet 参数: c = 3.5），基于对数尺度将 0.5~20 Hz 范围的频率分为 30 步（frequency steps），同时以反馈刺激前−500 ms 至−300 ms 时间段 EEG 作为基线进行校正。随后对不同条件下数据进行叠加，重新截取反馈刺激前 200 ms 和反馈刺激后 800 ms 时间段为分析窗口。为获得 delta 和 theta 活动功率，提取中心频率为 2.3 Hz（频谱带宽: 1.32 Hz）和中心频率为 5.6 Hz(频谱带宽: 3.2 Hz)的小波。基于结果图并参考前人研究(Bernat et al., 2011; Cohen et al., 2007），delta 成分分析时间窗口为反馈刺激后 220~430 ms，从 Cz 和 CPz 点取值并求平均数，theta 成分分析时间窗口为反馈刺激后 250~400 ms，从 Fz 和 FCz 点取值并求平均数。

2.4 数据统计与分析

行为层面上，对工作记忆任务中不同水平下的按键反应时与判断正确率进行配对样本 *t* 检验。ERP 数据的分析中，对 RewP、P3 和 LPP 波幅进行 3（WM load 条件：基线、低、高）×2（反馈效价：奖赏、无奖赏）两因素重复测量方差分析。

对 theta、delta 成分进 3（WM load 条件：基线、低、高）×2（反馈效价：奖赏、无奖赏）两因素重复测量方差分析。另外，由于 theta 的方差分析结果发现 WM load 条件和反馈效价存在交互作用，为了进一步分析不同 WM load 条件下的效价效应，将负反馈后的 theta 活动减去正反馈后的 theta 活动得到 theta 在正、负反馈间的差值，对该差值进行单因素（WM load 条件：基线、低、高）重复测量方差分析。

使用 SPSS 19.0 进行数据分析，对不符合球形假设的 *p* 值进行 Greenhouse- Geisser 校正。另外，统计结果报告了效果量，*t* 检验报告了 *d*，其中 $d = 0.2$ 时，效果小；$d = 0.5$ 时，效果中；$d = 0.8$ 时，效果大。*F* 检验报告了η_p^2，其中$\eta_p^2 < 0.06$ 时，表示关系微弱；$0.06 < \eta_p^2 < 0.14$，表示关系中等；$\eta_p^2 > 0.14$，表示关系较强。

3 结果

3.1 行为结果

被试在不同 WM load 条件下对再认材料的按键反应时无显著差异，$t(22) = -0.13$，$p = 0.902$。而判断正确率差异显著，$t(22) = 3.03$，$p = 0.006$，Cohen’ $d = 0.73$，95%CI = [1.01%, 5.39%]，相对于高 WM load 条件下(90.48 ± 4.94%)，低 WM load 条件下的正确率(93.69 ± 3.62%)更高。

3.2 ERP 结果

RewP 的结果如图 2 所示，效价主效应显著，$F(1, 22) = 46.31$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.68$，正反馈后的 RewP 波幅（11.12 ± 1.15 μV）比负反馈后 RewP 波幅（6.76 ± 0.93 μV）更正。其它主效应和交互效应均不显著，$ps \geq 0.100$。图 2 还呈现了 RewP 差异波及其地形图。RewP 差异波由每个 WM load 条件下的正反馈结果减去负反馈结果获得。RewP 差异波显示其约为 210~290 ms 的正成分，地形图显示其主要分布于头皮中线前部。

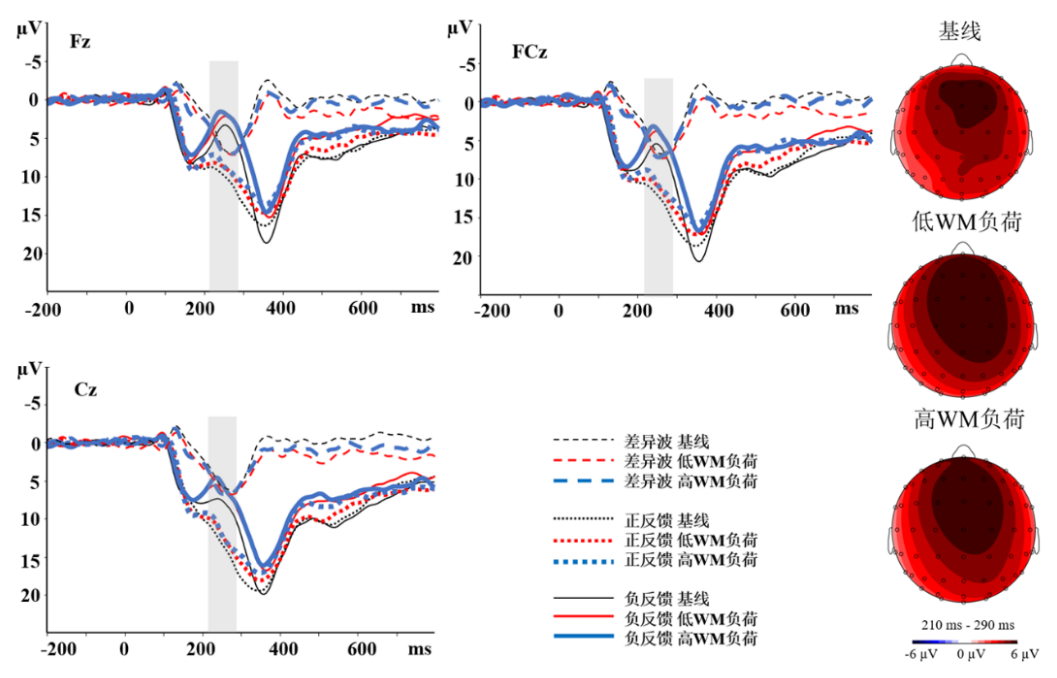


图 2　各条件下 RewP 原始波和差异波波形图（Fz，FCz 和 Cz 点），以及 RewP 差异波地形图

如图 3 所示，P3 效价主效应显著，$F(1, 22) = 21.65$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.50$，正反馈后 P3 波幅（14.10 ± 1.10 μV）比负反馈后 P3 波幅（11.46 ± 1.06 μV）更正。其他主效应或交互效应均不显著，$ps \geq 0.397$。

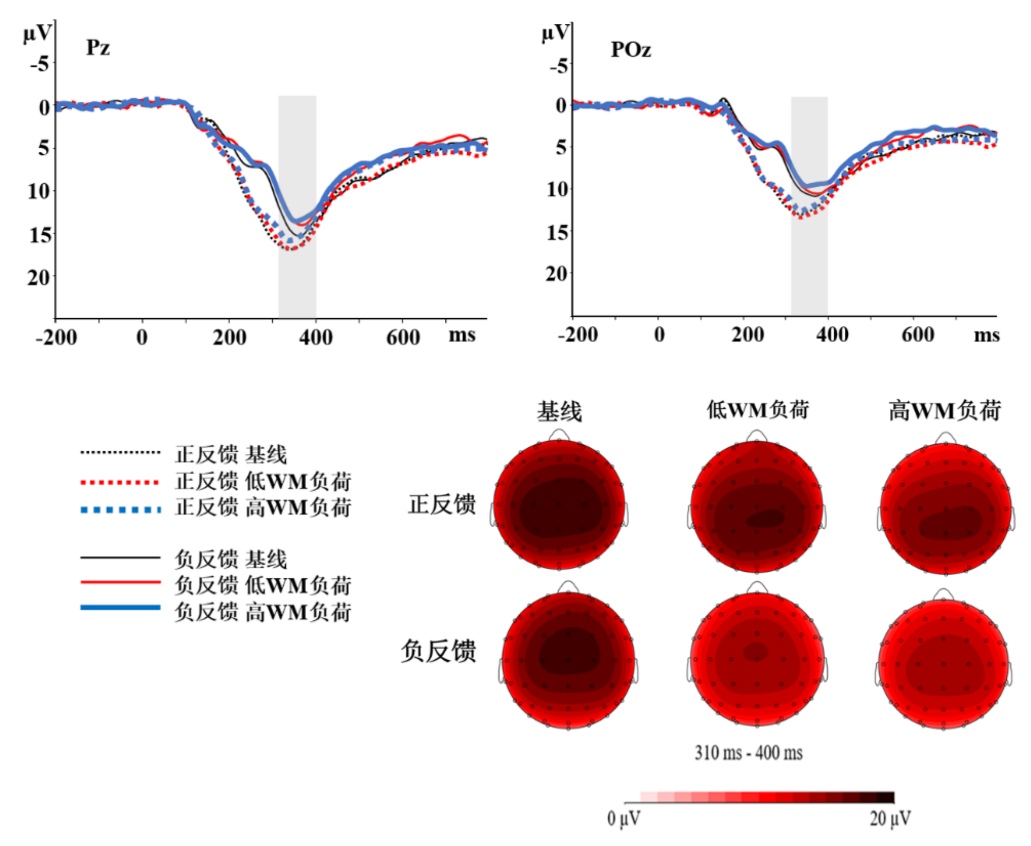


图 3 各条件下 P3 波形图（Pz 和 POz 点），以及 P3 地形图

如图 4 所示，LPP 结果显示 WM load × 效价交互作用边缘显著，$F(1, 22) = 2.58$，$p = 0.088$，$\eta_p^2 = 0.11$。由于效应量达到中等，进一步做简单效应检验，显示仅在高 WM load 条件下正、负效价间存在差异，正反馈后 LPP（7.13 ± 0.86 μV）大于负反馈后 LPP（5.94 ± 0.73 μV）。其他主效应或交互效应均不显著，$ps \geq 0.101$。

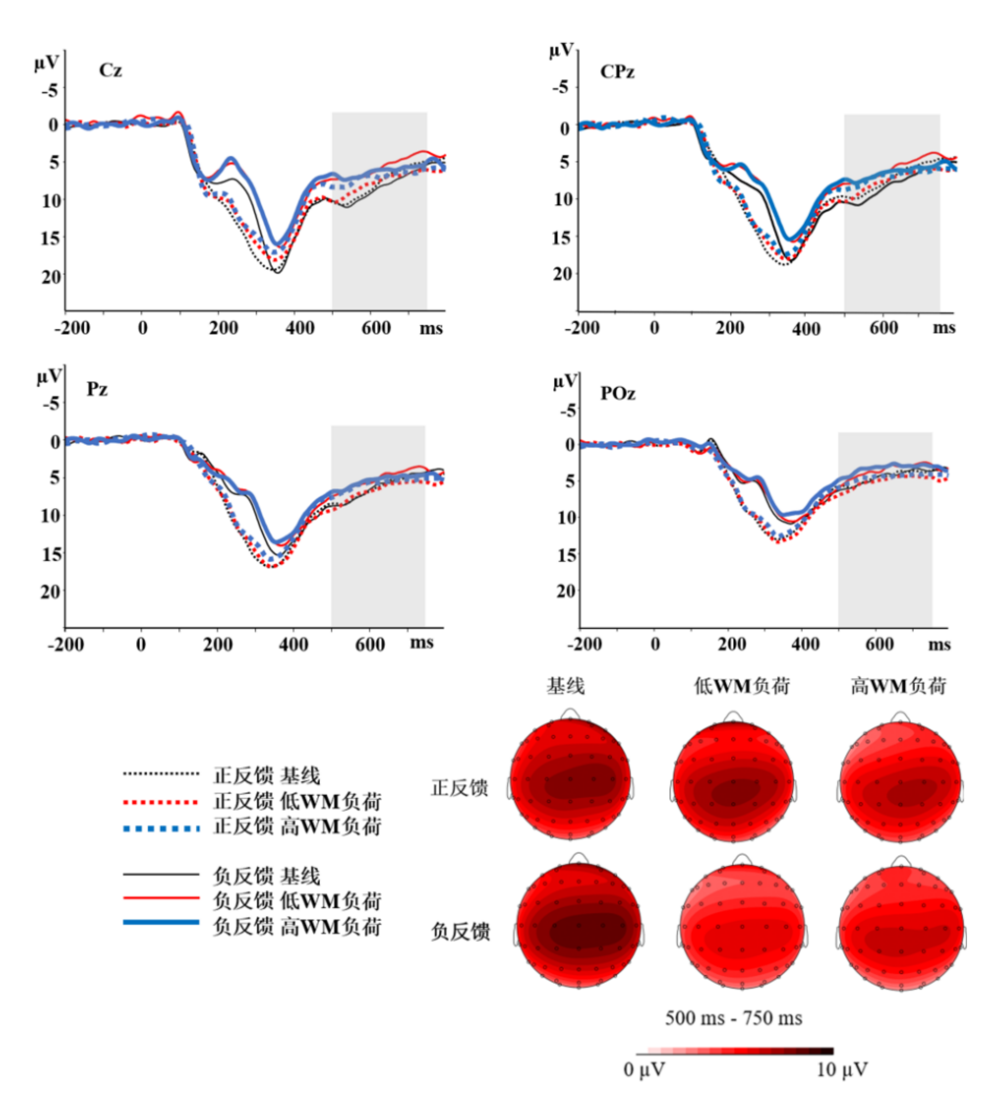


图 4　各条件下 LPP 波形图（Cz、CPz、Pz 和 POz 点），以及 LPP 地形图

3.3 时频分析结果

如图 5 所示，Theta 震荡结果显示 WM load 主效应显著，$F(1, 22) = 3.45$，$p = 0.040$，$\eta_p^2 = 0.14$。用 Bonferroni 方法做事后比较发现 theta 活动在高 WM load 条件（38.53 ± 6.73 μV²）和基线条件（47.86 ± 7.57 μV²）差异边缘显著，$p = 0.084$。由于 Bonferroni 方法比较严格，又采用 LSD 方法做事后比较，发现 theta 活动在高 WM load 条件比基线条件更小，$p = 0.028$。

效价主效应显著，$F(1, 22) = 17.88$，$p < 0.001$，$\eta 2\ P = 0.45$，负反馈后的 theta 活动（60.46 ± 10.12 μV^2）显著强于正反馈后 theta 活动（22.81 ± 3.66 μV^2）。

WM load 条件 × 效价交互作用显著，$F(1, 22) = 4.33$，$p = 0.019$，$\eta_p^2 = 0.16$，简单效应检验显示在各个 WM load 条件下效价间差异均显著（$ps < 0.004$）。对正、负反馈间 theta 差值的分析发现，WM load 主效应显著，$F(1, 22) = 4.33$，$p = 0.019$，$\eta_p^2 = 0.16$。低 WM load

条件下 theta 差值（43.10 ± 8.74 μV^2）大于高 WM load 条件下 theta 差值（29.49 ± 9.20 μV^2），p = 0.032。

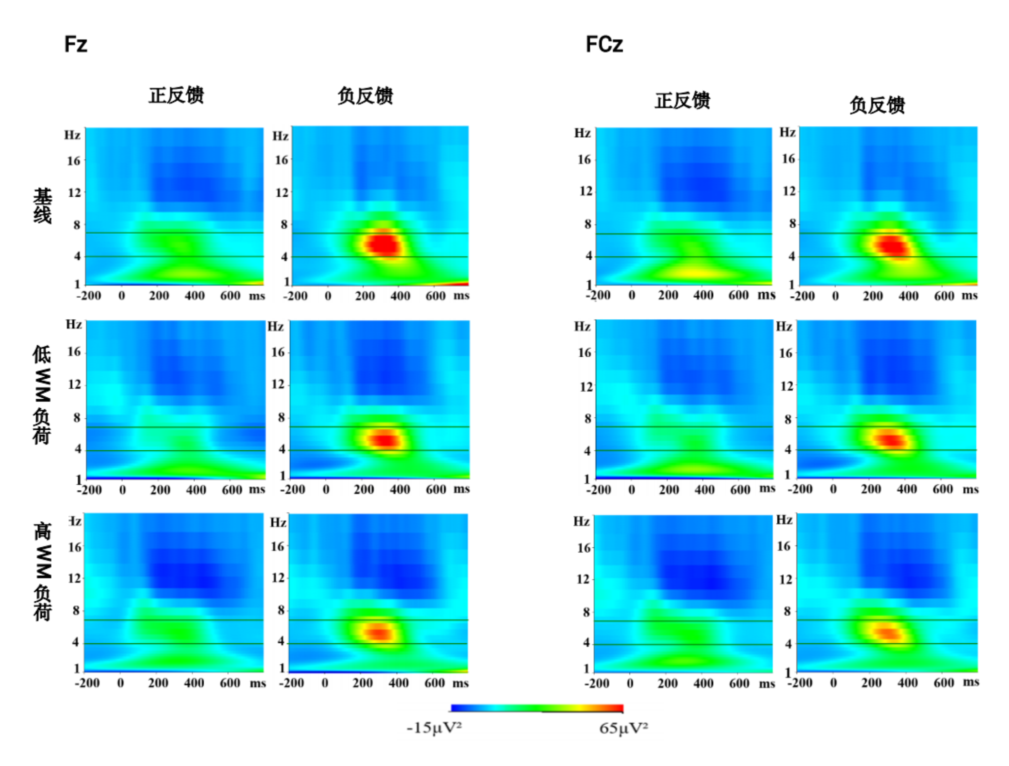


图 5　各条件下 theta 活动时频分析图（Fz 和 FCz 点）

如图 6 所示，Delta 结果显示效价主效应显著，$F(1, 22) = 14.97$，$p = 0.001$，$\eta_p^2 = 0.39$，正反馈后的 delta 活动(32.45 ± 4.27 μV^2)显著强于负反馈后 delta 活动(22.23 ± 2.94 μV^2)。其他主效应和交互效应均不显著，$ps \geq 0.172$。

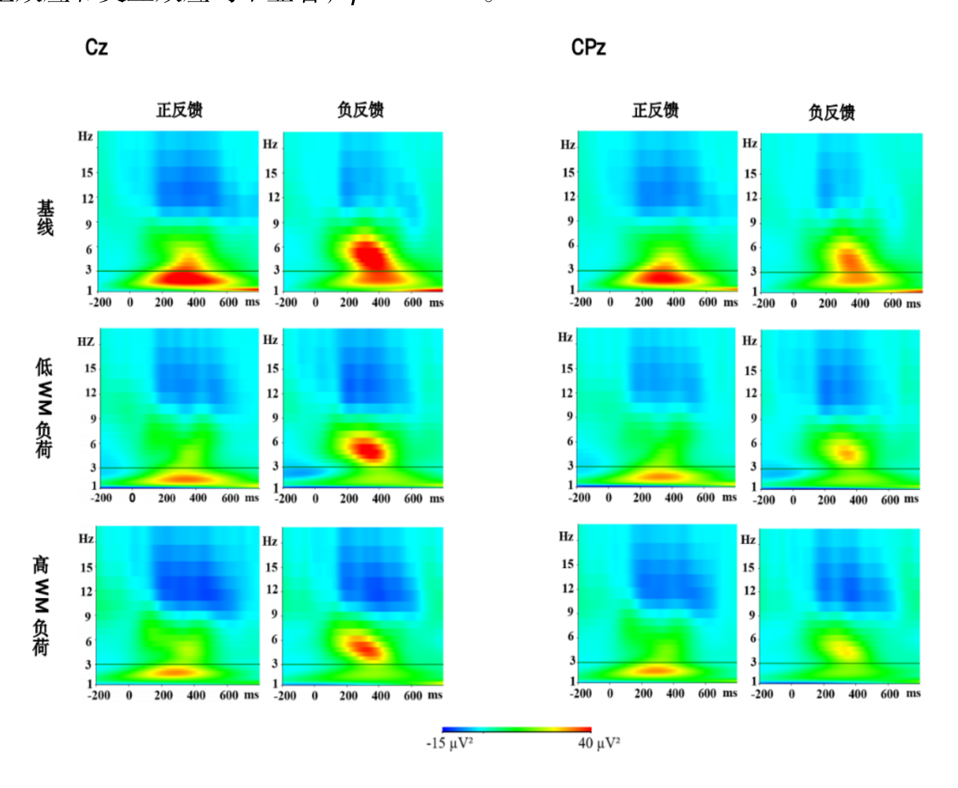


图 6　各条件下 delta 活动时频分析图（Cz 和 CPz 点）

4 讨论

本研究结合简单赌博任务和工作记忆任务，探讨了 WM load 条件对反馈加工的影响。行为层面，在工作记忆任务中，不同 WM load 条件下再认阶段的正确率差异显著，当需要记忆的小方块数量增加时正确率更低，表明对 WM load 条件的操纵是有效的。

电生理层面，首先，RewP 再现了效价效应（Gehring & Willoughby, 2002; Miltner et al., 1997; Sambrook & Goslin, 2015），相对于负反馈（无奖赏），正反馈（奖赏）后出现了更大的正向偏转。没有发现 WM load 对 RewP 的影响。其次，时频分析得到了反馈加工相关的 theta 和 delta 震荡，两者也表现出与前人研究一致的效价效应（Foti et al., 2015; Stewart et al., 2019; Webb et al., 2017）：负反馈后 theta 活动功率比正反馈后增加，正反馈后 delta 活动功率比负反馈后增加。更重要的是，WM load 变化调节了 theta 震荡的效价效应，较之于低 WM load 条件，高 WM load 条件下正、负反馈间 theta 震荡的差异减小。此外，考察了反馈加工中晚期阶段的 P3 和 LPP 成分。其中 P3 表现出效价效应，正反馈比负反馈诱发更正的 P3，但是不受 WM load 变化的影响。LPP 的效价和 WM load 水平的交互作用边缘显著，只有在高 WM load 条件下，正反馈后 LPP 波幅更正于负反馈后的 LPP 波幅。

RewP 对反馈效价敏感，正反馈诱发更正的 RewP，符合目前主流研究结果（Gehring & Willoughby, 2002; Glazer et al., 2018; Hajcak et al., 2006; Miltner et al., 1997; Sambrook & Goslin, 2015），也符合 HRL-ACC 理论的观点，即 RewP 是中脑多巴胺系统对效价评估的信号。另外，本研究发现 RewP 对 WM load 不敏感，依据 HRL-ACC 理论，RewP 是作用于 ACC 输入端的效价评估信号，本实验的结果说明 WM load 对作用于 ACC 的效价评估过程没有影响。

本研究发现 delta 和 theta 震荡分别对正反馈和负反馈敏感，直观上看该结果支持 Foti 等人（2015）的观点，delta 和 theta 震荡分别是个体加工正反馈和负反馈的脑电指标。并且本研究中只在 theta 结果中出现了 WM load 与效价的交互作用，WM load 越高，正、反馈诱发的 theta 活动差异量越小。这可以推测在对正、负反馈的评估过程中，随着 WM load 增加，负反馈的加工遭到损害，而正反馈的加工不受影响。但这种解释无法说明的一个事实是，为什么本研究中 WM load 对 RewP 没有影响。RewP 是衡量个体加工反馈效价能力的有效指标（Baker & Holroyd, 2011; Foti et al., 2011; Proudfit, 2015; Sambrook & Goslin, 2015），如果 WM load 增加时负反馈的加工受到损害，RewP 对正、负反馈的区分能力会

降低，在 RewP 的方差分析中会出现 WM load 与效价的交互作用。本研究没有发现此交互作用，不支持 theta 震荡反映负反馈加工的观点。

目前文献中关于 RewP 的研究也不支持 Foti 等人（2015）的观点。如前言第二段所述，反馈加工的 ERP 研究中一个基本结论是 RewP 反映了奖赏加工，是奖赏敏感性指标（Baker & Holroyd, 2011; Foti et al., 2011; Proudfit, 2015），而没有发现对负反馈敏感的 ERP 指标，似乎人脑没有加工负性结果。Oliveira 等人（2007）认为人们有乐观倾向，反应后倾向于预期获得正性结果。反馈呈现时，进行的是奖赏预期与反馈是否匹配的加工，而不是奖赏或损失的加工，因此研究中没有发现对负反馈敏感的 ERP 成分。人脑没有加工负反馈，这样的结论也佐证 theta 不应该是负反馈加工相关的成分。而 Delta 震荡对正反馈敏感，这一点目前观点比较一致。

如果 Theta 震荡不是对负反馈加工的信号，其反映心理功能是什么呢？这可以从 RewP（或者说是 FRN）的预期违背相关理论中得到启发。早期 RewP 被认为是负向成分 FRN（Gehring & Willoughby, 2002; Hajcak et al., 2006; Miltner et al., 1997），除了强化学习理论（Holroyd & Coles, 2002），还有预期违背相关理论对此成分做出解释。如反应-结果预期理论（predicted response-outcome model, PRO）（Alexander & Brown, 2010, 2011）认为人们利用反馈逐渐习得反应与结果（反馈）的关系，反应之后会形成对结果的预期，当结果与预期违背时，就会诱发 FRN。预期违背假设（expectation violation hypothesis）（Oliveira et al., 2007）观点与此类似。依据预期违背相关理论，负反馈诱发的认知活动不是负反馈加工本身，而是预期违背加工。该理论突出负反馈的意义，认为正反馈之后不需要控制，负反馈之后大脑会分配注意、实施控制改善行为（Alexander & Brown, 2010, 2011）。虽然目前已经认为 FRN（RewP）只对正反馈敏感，预期违背相关理论不能再以 FRN 作为验证的指标，但对负反馈敏感的 theta 震荡恰巧可以作为替代。也可以说 theta 震荡反映的是预期违背之后大脑实施的注意分配和认知控制功能，这一方面可以解决预期违背相关理论检验指标的问题，另一方面也支持 HRL-ACC 理论关于 theta 震荡的假设（Holroyd & Umemoto, 2016）。

HRL-ACC 理论认为 theta 震荡是认知控制信号，从 ACC 投射到腹外侧前额叶等脑区实施行为驱动（Holroyd & Umemoto, 2016; Holroyd & Yeung, 2011; Li et al., 2018）。HRL-ACC 理论这个观点的重要依据是 theta 震荡对认知资源（例如 WM load）水平敏感（Hsieh & Ranganath, 2014; Mitchell et al., 2008）。但是在反馈加工过程中，theta 震荡是否受到 WM load 水平的调节，还缺乏证据。本研究发现 WM load 影响 theta 震荡对反

馈效价的编码，高 WM load 条件下正、负反馈之间的 theta 震荡差异波相比于低 WM load 减小。结合 HRL- ACC 理论可以解释为 WM load 越高，theta 震荡编码正、负反馈的敏感性越低，ACC 依据不同的反馈对背外侧前额叶等脑区发出控制信号的能力越低。

关于 P3，实验中只观察到了 P3 的效价效应，相对于负反馈，正反馈诱发更大的 P3，这与前人研究一致（Yang et al., 2018; Zhou et al., 2010），并未观察到在不同 WM load 条件下 P3 的变化。以往许多研究中认为 P3 代表了认知或注意资源分配，P3 波幅大小与投入的认知资源有关（Glazer et al., 2018; Polich, 2007）。另有研究者从强化学习系统与工作记忆系统交互作用的角度论述了 P3 代表的心理意义（Ferdinand, 2019; Rodriguez et al., 2018）。Rodriguez 等人（2018）认为在反馈学习过程中，个体需要根据实际的反馈实时对奖赏预期值进行更新，这一能力部分依赖于工作记忆系统。然而本研究没有发现 WM load 对 P3 的影响，似乎与以上理论不符。一个可能的解释是本研究采用的任务为简单赌博任务，没有学习意义。被试虽然进行了反馈效价加工和认知控制输出，但是无法进行工作记忆更新和形成有效的规则标准，所以没有发现 P3 的 WM load 效应。

另外，LPP 结果发现效价与 WM load 的交互作用边缘显著，只在高 WM load 条件下观察到正、负反馈间 LPP 的差异显著。以往研究认为 LPP 反映了反馈加工晚期动机情感过程（Glazer et al., 2018），高 WM load 下 LPP 的效价效应可能表明其情感性价值的增加。已有研究表明在执行任务时，认知努力增加了随后奖赏的价值（Hernandez Lallement et al., 2014），类似的在高 WM load 条件下被试的努力程度更高，而对反馈结果赋予了额外的情感动机意义，因而 LPP 更大。同时也在一定程度上回答了为何以往研究中正、负反馈后 LPP 的差异有时能观察到，有时观察不到这一问题（Broyd et al., 2012; Meadows et al., 2016; Webb et al., 2017），实验任务给被试施加的 WM load 无疑是重要因素。

综上，本研究验证和丰富了 HRL- ACC 理论，支持 RewP 反映了反馈效价加工过程，而 theta 震荡体现了认知控制功能的观点，并且发现 WM load 的变化选择性影响了后者。然而，本研究采用的是简单赌博任务，没有学习意义。下一步应该采用有学习意义的任务，考查 HRL- ACC 理论中的反馈评估过程与认知控制过程，以及 WM load 在其中起到的作用。另外，本研究中基线条件的设置有不足之处。借鉴了 White 等人（2017）的研究，为了减少污染把基线条件单独拿出来，高、低 WM load 条件 blocks 随机呈现，而基线条件单独呈现。可能正是这样的设置导致基线条件与高、低 WM load 条件差异不稳定。在未来研究中要更好的设计 WM load 条件中的基线条件。

参考文献

Alexander, W. H., & Brown, J. W. (2010). Computational models of performance monitoring and cognitive control. *Topics in Cognitive Science, 2*(4), 658–677.

Alexander, W. H., & Brown, J. W. (2011). Medial prefrontal cortex as an action- outcome predictor. *Natture Neuroscience, 14*(10), 1338–1344.

Baker, T. E., & Holroyd, C. B. (2011). Dissociated roles of the anterior cingulate cortex in reward and conflict processing as revealed by feedback error- related negativity and N200. *Biological Psychology*. *87*, 25–34.

Bernat, E. M., Nelson, L. D., Steele, V. R., Gehring, W. J., & Patrick, C.J. (2011). Externalizingpsychopathology and gain–loss feedback in a simulated gambling task: dissociable components of brain response revealed by time–frequency analysis. *Journal of Abnormal Psychology*. *120*, 352–64.

Broyd, S. J., Richards, H. J., Helps, S. K., Chronaki, G., Bamford, S., & Sonuga- Barke, E. J. S. (2012). An electrophysiological monetary incentive delay (e- MID) task: A way to decompose the different components of neural response to positive and negative monetary reinforcement. *Journal of Neuroscience Methods*, *209*(1), 40–49.

Cheng, J. P., Luo, Y. J., & Cui, F. (2017). Empathy for pain influenced by cognitive load: Evidence from an ERP study. *Acta Psychologica Sinica*, *49*(5), 622–630.

[程家萍, 罗跃嘉, 崔芳. (2017). 认知负荷对疼痛共情的影响：来自 ERP 研究的证据. *心理学报*, *49*(5), 622–630.]

Cohen, M. X., Elger, C. E., & Ranganath, C. (2007). Reward expectation modulates feedback- related negativity and EEG spectra. *NeuroImage*. 35:968–78.

Donaldson, K. R., Ait Oumeziane, B., Hélie, S., & Foti, D. (2016). The temporal dynamics of reversal learning: P3 amplitude predicts valence- specific behavioral adjustment. *Physiology & Behavior*, *161*, 24–32.

Donchin, E., & Coles, M. G. H. (1988). Is the P300 component a manifestation of context updating? *Behavioral & Brain Sciences*, *11*(03), 357–374.

Ferdinand, N. K. (2019). The influence of task complexity and information value on feedback processing in younger and older adults: No evidence for a positivity bias during feedback- induced learning in older adults. *Brain Research*, *1717*, 74–85.

Foti D., Weinberg, A., Dien, J., Hajcak, G. (2011). Event- related potential activity in the basal ganglia differentiates rewards from nonrewards: temporospatial principal components analysis and source localization of the feedback negativity. *Human Brain Mapping. 32*, 2207–2216.

Foti, D., Weinberg, A., Bernat, E. M., & Proudfit, G. H. (2015). Anterior cingulate activity to monetary loss and basal ganglia activity to monetary gain uniquely contribute to the feedback negativity. *Clinical Neurophysiology*, *126*(7), 1338–1347.

Gehring, W. J., & Willoughby, A. R. (2002). The medial frontal cortex and the rapid processing of monetary gains and losses. *Science*, *295*(5563), 2279–2282.

Glazer, J. E., Kelley, N. J., Pornpattananangkul, N., Mittal, V. A., & Nusslock, R. (2018). Beyond the FRN: Broadening the time- course of EEG and ERP components implicated in reward processing. *International Journal of Psychophysiology*, *132*, 184–202.

Hajcak, G., Dunning, J. P., & Foti, D. (2009). Motivated and controlled attention to emotion: Time- course of the late positive potential. *Clinical Neurophysiology*, *120*(3), 505–510.

Hajcak, G., Moser, J. S., Holroyd, C. B., & Simons, R. F. (2006). The feedback- related negativity reflects the binary evaluation of good versus bad outcomes. *Biological psychology*, *71*(2), 148–154.

Han, M., Shi, L., & Jia, S. (2017). Attentional resources modulate error processing- related brain electrical activity: Evidence from a dual- task design. *Brain Research*, *1670*, 68–75.

Hernandez Lallement, J., Kuss, K., Trautner, P., Weber, B., Falk, A., & Fliessbach, K. (2014). Effort increases sensitivity to reward and loss magnitude in the human brain. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *9*(3), 342–349.

Hsieh, L.T., & Ranganath, C. (2014). Frontal midline theta oscillations during working memory maintenance and episodic encoding and retrieval. *Neuroimage. 85*, 721–729.

Holroyd, C. B., & Coles, M. G. H. (2002). The neural basis of human error processing: Reinforcement learning, dopamine, and the error- related negativity. *Psychological Review*, *109*(4), 679–709.

Holroyd, C.B., & Yeung, N. (2011). An integrative theory of anterior cingulate cortex function: option selection in hierarchical reinforcement learning. In: Mars, R.B., Sallet, J., Rushworth, M.F.S., Yeung, N. (Eds.), *Neural Basis of Motivational and Cognitive Control*. MIT Press, Cambridge, MA, pp. 333–349.

Holroyd, C. B., & Umemoto, A. (2016). The research domain criteria framework: The case for anterior cingulate cortex. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *71*, 418–443.

Huang, C., & Yu, R. (2018). Making mistakes in public: Being observed magnifies physiological responses to errors. *Neuropsychologia*, *119*, 214–222.

Krigolson, O. E., Hassall, C. D., Satel, J., & Klein, R. M. (2015). The impact of cognitive load on reward evaluation. *Brain research*, *1627*, 225–232.

Krigolson, O. E., Heinekey, H., Kent, C. M., & Handy, T. C. (2012). Cognitive load impacts error evaluation within medial- frontal cortex. *Brain research*, *1430*, 62–67.

Langeslag, S. J. E., & van Strien, J. W. (2013). Up- regulation of emotional responses to reward- predicting stimuli: An ERP study. *Biological Psychology*, *94*(1), 228–233.

Li, P., Peng, W., Li, H., & Holroyd, C. B. (2018). Electrophysiological measures reveal the role of anterior cingulate cortex in learning from unreliable feedback. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *18*(5), 949–963.

Luft, C. D. B. (2014). Learning from feedback: The neural mechanisms of feedback processing facilitating better performance. *Behavioural Brain Research*, *261*, 356–368.

Meadows, C. C., Gable, P. A., Lohse, K. R., & Miller, M. W. (2016). The effects of reward magnitude on reward processing: An averaged and single trial event- related potential study. *Biological Psychology*, *118*, 154–160.

Miltner, W. H. R., Braun, C. H., & Coles, M. G. H. (1997). Event- related brain potentials following incorrect feedback in a time- estimation task: Evidence for a "generic" neural system for error detection. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *9*(6), 788–798.

Mitchell, D. J., McNaughton, N., Flanagan, D., Kirk, I. J., (2008). Frontal- midline theta from the perspective of hippocampal theta. *Progress In Neurobiology*. *86*, 156–185.

Nieuwenhuis, S., Aston- Jones, G., & Cohen, J. D. (2005). Decision making, the P3, and the locus coeruleus- - norepinephrine system. *Psychological Bulletin*, *131*(4), 510–532.

Oliveira, F. T., Mcdonald, J. J., & Goodman, D. (2007). Performance monitoring in the anterior cingulate is not all error related: expectancy deviation and the representation of action- outcome associations. *Journal of Cognitive Neuroscience, 19*(12), 1994–2004.

Polich, J. (2007). Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology*, *118*(10), 2128–2148.

Proudfit, G. H. (2015). The reward positivity: From basic research on reward to a biomarker for depression. *Psychophysiology*, *52*(4), 449–459.

Rodriguez Buritica, J. M., Heekeren, H. R., Li, S.-C., & Eppinger, B. (2018). Developmental differences in the neural dynamics of observational learning. *Neuropsychologia*, *119*, 12–23.

Sambrook, T. D., & Goslin, J. (2015). A neural reward prediction error revealed by a meta-analysis of ERPs using great grand averages. *Psychological bulletin*, *141*(1), 213.

Shahnazian, D., Shulver, K., & Holroyd, C. B. (2018). Electrophysiological responses of medial prefrontal cortex to feedback at different levels of hierarchy. *NeuroImage*, *183*, 121–131.

Stewart, J. G., Singleton, P., Benau, E. M., Foti, D., Allchurch, H., Kaplan, C. S., . . . Auerbach, R. P. (2019). Neurophysiological activity following rewards and losses among female adolescents and young adults with borderline personality disorder. *Journal of Abnormal Psychology*, *128*(6), 610–621.

Webb, C. A., Auerbach, R. P., Bondy, E., Stanton, C. H., Foti, D., & Pizzagalli, D. A. (2017). Abnormal neural responses to feedback in depressed adolescents. *Journal of Abnormal Psychology*, *126*(1), 19–31.

White, E. J., & Grant, D. M. (2017). Electrocortical consequences of image processing: The influence of working memory load and worry. *Psychiatry Research: Neuroimaging*, *261*, 1–8.

Yang, Q., Zhao, D., Wu, Y., Tang, P., Gu, R., & Luo, Y.-j. (2018). Differentiating the influence of incidental anger and fear on risk decision-making. *Physiology & Behavior*, *184*, 179–188.

Yeung, N., & Sanfey, A. G. (2004). Independent coding of reward magnitude and valence in the human brain. *Journal of Neuroscience*, *24*(28), 6258–6264.

Zhou, Z., Yu, R., & Zhou, X. (2010). To do or not to do? Action enlarges the FRN and P300 effects in outcome evaluation. *Neuropsychologia*, *48*(12), 3606–3613.

The effects of working memory load on feedback processing: Evidence from an event-related potentials (ERP) study

JIA Shiwei, QI Congcong, CHEN Lele, REN Yanju

(School of Psychology, Shandong Normal University, Jinan 250358, China)

Abstract

Feedback processing plays an important role in behavior modification and knowledge acquisition. Previous research has explored the neurophysiological basis and psychological functions of feedback processing and proposed corresponding theoretical models, but little is known about how working memory (WM) load affects feedback processing. Studies have reported electrophysiological indicators, such as the reward positivity (RewP) and the related theta and delta oscillations, the P3 and the late positive potential (LPP), during brain processing feedback. This study will further examine how WM load modulates these electrophysiological components and their corresponding cognitive functions.

In the present study, we used a dual-task paradigm to investigate feedback processing under different WM load conditions. This study included 25 healthy college students and used a 3 (WM load: baseline vs. low WM load vs. high WM load) by 2 (feedback valence: positive vs. negative) within-participant factorial design. During the experiment, participants were asked to perform a simple gambling task and a spatial memory task simultaneously, and the magnitude of the WM load included three conditions: baseline, low WM load and high WM load. The RewP generated in the early stage of feedback processing and the LPP generated in the late stage of feedback processing, as well as the delta and theta oscillations related to feedback evaluation, were analyzed.

The behavioral results showed that the accuracy of the low WM load condition was significantly higher than that of the high WM load condition. The electrophysiological results showed that the amplitudes of the RewP were sensitive to feedback valence, with positive feedback evoking larger RewP than negative feedback, but the RewP was not affected by the WM load. There was no difference in the P3 amplitude under the different WM load conditions. For the LPP, there was a significant interaction between the WM load and feedback valence. Further analysis revealed that, in the high WM load condition, the LPP amplitude was larger for positive feedback than for negative feedback. The theta power differences between negative feedback and positive feedback were larger in the low WM load condition than in the high WM load condition. For delta oscillations, the power was increased after positive

feedback compared to after negative feedback, but there was no difference at different WM load levels.

The RewP results indicate that the participants process feedback valence information well under all three WM load conditions in the experiment. The LPP results suggest that the participants assigned additional emotional motivation to the feedback outcome as a result of their cognitive efforts under high WM load conditions. The ERP results for the time domain dimension showed that the effect of the WM load on feedback processing was most noticeable in the later stages of feedback processing. Moreover, these observations support the argument that the RewP and theta power reflect distinct cognitive phenomena; namely, the RewP reflects the processing of feedback valence in the anterior cingulate cortex (ACC), whereas theta oscillations reflect the role of the ACC in cognitive control. The WM load selectively modulates the cognitive control process in the ACC.

Key words WM load, feedback, reward positivity (RewP), theta oscillation, anterior cingulate cortex